

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文審査報告書

論 文 題 目

大深度シールドトンネルにおける施工時荷重
作用時のセグメントの損傷に関する研究

Study on the Damage to the Segments Caused by Load
during Construction of Shield Tunnel in Deep Underground

申 請 者

斉藤	仁
Jin	SAITO

2014 年 2 月

シールド工法は、都市部の鉄道、道路、上下水道、電力洞道、通信用とう道、ガス導管路などのインフラ設備を構築するための一般工法としてわが国では多用されている。本研究が対象とした電力設備においても、高度成長期を迎えた 1960 年代から、都市部における超高圧地中送電線や火力発電所の燃料となる LNG を輸送するガス導管を収容する設備として、シールド工法によるトンネルが構築されてきており、その結果、都区内における送電線の地中化率は 90%を超え、首都圏の電力安定供給を担う重要な電力設備となっている。

近年、シールド工法は大断面化や大深度化がその開発テーマになってきている。一般に、トンネルが大深度に位置する場合には、周辺地盤は自立性が高いことから、セグメントに作用する土圧は小さく、一方で水圧が卓越する。また、大深度地下に構築されるトンネルは、地盤それ自体が設計上の工学的基盤面に相当するため、地震による影響はほとんどないものと考えられる。したがって、周辺地盤からトンネルに作用する主たる荷重は水圧となるため、トンネルが円形断面であれば、トンネルの横断面方向に発生する断面力は軸力が主導的になる。結果として、設計上はセグメントの厚さが薄くでき、鉄筋量も軽減できる場合が多く、トンネルの主覆工部材であるセグメントは、経済性の追求から薄肉化、幅広化する傾向がある。

一方で、大深度地下にシールドトンネルを構築する場合は、高い水圧によってジャッキ推力、裏込め注入圧、止水用のシール材の反発力、およびテールシールの拘束力などの施工時荷重が増大する。また、トンネルが深くなるとシールドの発進用立坑や到達用立坑も深くなるため、立坑の構築費用が格段に増加する。立坑の数を減らしてシールドの掘進距離を長くすれば、掘削を高速化することが要求されるため、それによってもジャッキ推力は大きくなる傾向にある。すなわち、シールドトンネルが大深度化するにともない、施工時荷重が他の荷重に比べて支配的な荷重になることから、施工時荷重に対するセグメントの設計法を確立することが重要となってきている。

施工時荷重によるセグメントの損傷には、トンネルの崩壊に至るような断面破壊から、トンネルの長期にわたる耐久性に影響を与えるような割れや欠け、あるいはひび割れなどが考えられる。現在までのところ、施工時荷重により断面破壊を生じた例は皆無ではないが非常にまれであり、施工時荷重によって実際に発生するのは比較的小さな損傷がほとんどである。シールドトンネルの構築深度が深くなり、施工時荷重が増大するにともなって、それらの損傷の発生が顕在化してきている。断面破壊を生じるような損傷を設計の対象とするのは比較的容易である一方で、セグメントの割れや欠け、ひび割れなどを設計段階で詳細に検討することは困難である場合が多く、既往の研究においても詳細にこれに言及した事例は極めて少ない。しかし、これらの小さな損傷がトンネルの耐久性に大きな影響を与えている実例が多くみられるようになってきたことも事実である。

本研究は、このような状況を背景として、大深度地下に構築されるシールドトンネルにおいて、その覆工部材に鉄筋コンクリート製セグメントを用いた場合を対象に、実際の現場におけるセグメントの挙動の観察と計測およびセグメントの組立てとシー

ルドの掘進を模擬した三次元 **FEM** 解析によって、トンネルの施工時に発生するセグメントの損傷の原因を明らかにするとともに、**K**セグメントの形状やシールドジャッキの作用パターン、トンネルの半径方向あるいは円周方向の拘束効果などをパラメータとした三次元シェルばねモデルによる解析を行って、セグメントの損傷を抑制する具体的な方策を提案したものである。

本論文は 6 章から構成されている。各章の概要は以下に示すとおりである。

第 1 章は序論である。この章では、まず、シールド工法の歴史および電力設備としてのシールドトンネルの役割を述べ、つぎに、近年増えつつある大深度トンネルにおける施工時のセグメントの設計上の課題ならびに既往の研究の動向を整理し、本研究の目的と本論文の構成を述べている。

第 2 章は、セグメントの現場計測から確認されたセグメントの損傷の種類と原因について述べられた章である。セグメントの計測が実施された工事は、東京電力(株)の千葉県富津火力発電所 LNG 基地と神奈川県東扇島火力発電所 LNG 基地との間を、東京湾の海底下で連係したシールドトンネル工事である。トンネルの平面線形はほぼ直線であるが、縦断線形は全線の約 70%が海面下 50m 以深に位置することから、代表的な大深度のシールド工事である。ここでは、まず、現場におけるセグメントの挙動を詳細に観察して、損傷がどこに生じるか、どのタイミングで生じるかを検討している。その結果、割れや欠けあるいはひび割れが発生する確率が高いのは、**K**セグメントおよびそれに接する **B**セグメントであること、それらの損傷がセグメントの組立てにともなうシールドジャッキの押し引きにより発生すること、それにともない **K**セグメントの継手には顕著な目開きや目違いが発生することなどを明らかにしている。つぎに、**K**セグメントの挙動を定量的に把握する目的で、**K**セグメントを中心とした目開き量および目違い量の計測を実施し、その結果、セグメントリングが精度よく組み立てられたとしても、それが地山からの拘束を受けるまでの間は、つぎのリングの組立ての際のシールドジャッキの押し引きにより、**K**セグメントが最大 3mm 程度の微小な動きを繰り返すことを確認している。とくに、組み立てられた **K**セグメントからシールドジャッキが引き戻されるときに **K**セグメントは切羽側に押し出され、かつ切羽側で隣接する **B**セグメントに対してより大きく内空側に変位すること、この動きの過程において、**K**セグメントの鋭角部が **B**セグメントと接触したり、**K**セグメントとつぎのリングとの間に支点が発生したりするため、セグメントに割れや欠け、あるいはひび割れなどの損傷が生じる可能性があることなどを明らかにしている。

第 3 章は、三次元シェルばねモデル解析法を用いて、セグメントの損傷の可能性とその原因について詳細な検討を行った章である。ここでは、まず、シールド工事の現場条件をもとに、セグメントの組立てとシールドの掘進過程を忠実に評価し、解析モデルを設定するうえでの解析範囲、解析ステップ、作用荷重、構造モデル、および境界条件について詳述している。つぎに、解析結果として得られた応力状態や変形状態を解析ステップごとに分析し、損傷を生じる可能性が高い施工ステップを抽出すると

ともに、その抽出された施工ステップにおいては、損傷が K セグメントの形状、継手の締結力やその剛性などに加えて、施工条件、とくに K セグメントの組立て位置、シールドジャッキの配置とその押し引き、テールシールの位置やその剛性などが組み合わされて発生することを指摘している。

第 4 章は、三次元シェルばねモデル解析法を用いて、K セグメントの形状をパラメータとして、セグメントの組立てとシールドの掘進過程の詳細な検討を行い、その結果をもとに、K セグメントの形状に着目した損傷の抑制方策を提案した章である。すなわち、K セグメントの弧長がセグメントの損傷に与える影響は比較的小さく、挿入角の大きさがその支配的な要因となっていること、損傷の抑制に効果的である挿入角の大きさは 8 度程度以下であること、また、ジャッキ推力によって生じるトンネル円周方向の引張応力度を、コンクリートのポアソン比により生じる引張応力度程度に制限することができればひび割れを抑制できること、したがって、セグメントのひび割れに対する設計では、これらの引張応力度を照査すればよいことなどを明らかにした。

第 5 章は、三次元シェルばねモデルによる解析を行い、シールドジャッキの作用パターンやトンネルの半径方向および円周方向の拘束効果をパラメータとし、セグメントやシールドマシンの設計条件および施工条件に着目した損傷の抑制方策を提案した章である。すなわち、セグメントの組立て時に、セグメントに損傷を与える可能性が高いジャッキパターンが存在すること、このようなジャッキパターンを避けるような施工計画を立案する必要があること、また、トンネルの半径方向あるいは円周方向にセグメントを拘束することができれば、セグメントの損傷の抑制に高い効果を発揮できることを示し、セグメント継手による拘束のみならず、セグメントの外側からトンネル円周方向に軸圧縮力を発生させるような施工上の工夫が有効であることを示した。

第 6 章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめるとともに、今後の研究の課題についても言及している。

これを要するに、本研究はシールド工事の現場における詳細な観察と計測、三次元 FEM および三次元シェルばねモデルを用いた解析によって、シールドトンネルの長期にわたる耐久性に大きな影響を与えるセグメントの割れや欠け、ひび割れなどの損傷をどのようにすれば抑制できるか、また、セグメントの設計やシールド工事の施工において、どのようにすれば損傷を制御できるかを具体的に提示したものである。

よって、本論文はトンネル工学の発展に重要な貢献をなすものであり、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2013 年 12 月

審査員

主査	早稲田大学	教授	工学博士（早稲田大学）	小泉 淳
	早稲田大学	教授	工学博士（早稲田大学）	依田 照彦
	早稲田大学	教授	工学博士（東京工業大学）	清宮 理
	早稲田大学	教授	博士（工学）（東北大学）	秋山 充良